

УДК 574.5

**ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА  
ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА  
КАК ВОДОЕМА МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Н.Ю. Степанова*

**Аннотация**

В статье обоснован алгоритм и представлены обобщенные подходы к оценке экологического риска для устойчивого функционирования Куйбышевского водохранилища как водоема многоцелевого использования.

**Ключевые слова:** экологический риск, водохранилище, функционирование экосистем.

---

**Введение**

Анализ и управление эколого-экономическими рисками являются важнейшими направлениями в области прикладной экологии и играют важную роль при разработке принципов и практических мер, направленных на охрану и управление функционированием экосистемами. Оценка экологического риска представляет собой процедуру выявления одного или нескольких стрессовых для экосистемы факторов и определения вероятности их опасного воздействия на совокупность живых организмов (в том числе человека) [1–3]. Эта процедура включает в себя оценку и систематизацию данных о влиянии антропогенных факторов на экосистемы различных уровней с целью разработки экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу и принятия правильных управленческих решений [4].

Процедура оценки экологического риска достаточно хорошо разработана по отношению к факторам, воздействующим на здоровье человека [5, 6], к отдельным компонентам водных экосистем [7–9]: донным отложениям, биоразнообразию в целом или видам, наиболее важным для функционирования экосистемы либо ценным для человека. Однако оценка риска для водохранилища как сложно организованной системы с множественными компенсаторными возможностями и пролонгированным ответом на стрессовые факторы пока еще детально не разработана.

Целью работы является оценка экологического риска как меры потенциальной опасности для устойчивого функционирования Куйбышевского водохранилища – водоема многоцелевого использования.

### Материалы и методы

Объектом исследования было Куйбышевское водохранилище. В ходе экспедиционных выездов в 1999–2007 гг. отбирались пробы воды, донных отложений, биологических образцов (фитопланктон, зоопланктон, бентос, рыба) для биологического, химического и гранулометрического анализов. Гидрохимический и биологический анализы проводились по традиционным методикам [10–12].

При комплексной оценке донных отложений использовался метод триады [13, 14], в соответствии с которым последовательно определялся класс качества донных отложений по химическим, биологическим и токсикологическим показателям с последующей конвертацией в обобщенный класс.

Для оценки патологоанатомического состояния рыб использовалась методика [15], позволяющая дать оценку состояния рыб по пятибалльной системе.

Анализ заболеваемости населения Республики Татарстан проводился по данным Государственных докладов «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Республике Татарстан» за 1997–2005 гг.

Статистическая обработка результатов количественного химического, биологического и токсикологического анализов проводилась с использованием программного продукта Statistica 6.0.

### Разработка алгоритма оценки экологического риска

В основу методологии оценки экологического риска для устойчивого функционирования экосистемы Куйбышевского водохранилища в условиях многоцелевого использования был положен следующий алгоритм действий: формулирование проблемы – анализ ситуации – характеристика риска – совершенствование управления водохозяйственной деятельностью (рис. 1).

На протяжении последних десятилетий исследователями Куйбышевского водохранилища отмечается ухудшение его состояния по различным показателям: изменение видового состава ихтиофауны [16], изменение показателей планктонных организмов, проблема вселенцев [17, 18], ухудшение показателей здоровья населения Волжского региона [19]. В этой связи актуальным становится анализ стрессовых факторов, поиск причинно-следственных зависимостей между показателями среды обитания и наблюдаемым биологическим ответом в экосистеме. Это определяет второй этап процедуры оценки экологического риска. Следующий этап связан с интерпретацией результатов проведенного исследования, выражающейся в количественной оценке риска (нахождение индекса риска) и определении экологического статуса (потенциала) водоема в соответствии с существующими и предложенными экспертными оценками. Наконец, последний этап заключается в совершенствовании бассейнового управления, во внедрении разработанных ранее [20] экологически обоснованных нормативов качественного состава воды и донных отложений.



Рис. 1. Алгоритм оценки экологического риска для устойчивого функционирования Куйбышевского водохранилища

### Определение экологического потенциала Куйбышевского водохранилища

Состояние биологической системы оценивается по некоторым частным показателям, в изменении которых находит отражение преобладание деструктивных или адаптивно-компенсаторных процессов [21]. В данной работе обосновывается метод экспертной оценки статуса (потенциала) водохранилищ, который представляет собой наиболее простой способ выявления экологического неблагополучия в водных экосистемах посредством фиксации наличия или отсутствия в ней определенных чувствительных к комплексным и специфическим загрязнениям индикаторных организмов.

При экспертной оценке использовались прежде всего хорошо зарекомендовавшие себя классификаторы качества вод (цит. по [22]), а также предлагаемые в настоящей работе по совокупности многолетних экспериментальных данных классификаторы.

В основу расчета положены следующие количественные показатели.

1. Подындекс, характеризующий качество воды (ИХС) через гидрохимические показатели конкретного водохранилища:

$$\text{ИХС} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{N_h},$$

где  $H_i$  – относительная оценка по 4-балльной шкале используемых гидрохимических показателей (БПК<sub>5</sub>, азот аммонийный, азот нитритов, азот нитратов, фосфаты, фенолы),  $N_h$  – количество анализируемых гидрохимических показателей и ингредиентов соответственно.

2. Подындекс биотического состояния фитопланктона и зоопланктона ИБС<sub>к</sub>:

$$\text{ИБС}_k = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{N_b},$$

где  $B_i$  – относительная оценка используемых биологических показателей по 4-балльной шкале,  $N_b$  – количество анализируемых биологических показателей.

В качестве ИБС<sub>к</sub> рассматриваются:

ИБС<sub>ф</sub> – индекс биологического состояния по фитопланктонному сообществу (показатель – биомасса фитопланктона);

ИБС<sub>з</sub> – индекс биологического состояния по зоопланктонному сообществу (показатели – ИВР, коэффициент трофии, показатель трофности, индекс сатрибности [23]).

3. Подындекс ИБС<sub>б</sub>, характеризующий состояние донных отложений (определяется в соответствии с триадным методом [13, 14];

4. Подындекс ИБС<sub>р</sub> (показатель биологического состояния рыб), характеризующий патологоанатомическое состояние рыб [15];

5. Подындекс ИЗН, характеризующий состояние здоровья населения, оценивается через превышение среднего уровня заболеваемости по основным экологозависимым классам заболеваний относительно фонового уровня.

Для оценки интегральной величины ИЭС водоема перечисленные количественные показатели предлагается нормировать в единой шкале с приданием каждому из них определенного статистического веса ( $k_i$ ) с учетом региональных особенностей:

$$\text{ИЭС} = \frac{\sum (\text{ИБС}_\phi \cdot k_i + \text{ИБС}_3 \cdot k_i + \text{ИБС}_\text{б} \cdot k_i + \text{ИБС}_\text{р} \cdot k_i + \text{ИЗН} \cdot k_i + \text{ИХС} \cdot k_i)}{6}.$$

По значению ИЭС можно оценить качество воды, экологический статус (потенциал) и экологический риск для устойчивого функционирования водохранилища в соответствии с табл. 1.

Разработанная методология и предложенный экспериментально-расчетный способ определения индекса экологического статуса водохранилища как интегрального критерия оценки экологического риска апробированы на примере Куйбышевского водохранилища.

Табл. 1

Классификация качества воды, экологического потенциала и экологического риска по показателям ИЭС

| Значение ИЭС | Качество воды         | Характеристика экологического статуса/потенциала | Классификация экологического риска |
|--------------|-----------------------|--|------------------------------------|
| 1.0–2.0      | Чистая                | Хороший/высокий                                  | Низкий                             |
| 2.1–3.0      | Умеренно-загрязненная | Удовлетворительный/хороший                       | Умеренный                          |
| 3.1–4.0      | Загрязненная          | Неудовлетворительный/низкий                      | Повышенный                         |
| > 4.0        | Грязная               | Плохой/чрезвычайно низкий                        | Высокий                            |

Табл. 2

Количественные данные для расчета индекса экологического состояния (ИЭС) Куйбышевского водохранилища по плесам

| Плесы                              | Комплексные показатели |                  |                  |                  |                  |      | ИЭС |
|------------------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|-----|
|                                    | ИХС                    | ИБС <sub>ф</sub> | ИБС <sub>з</sub> | ИБС <sub>б</sub> | ИБС <sub>р</sub> | ИЗН  |     |
| Весовой коэффициент ( $k_i$ )      | 2                      | 1                | 1                | 1                | 1                | 2    |     |
| Волжский                           | 2.5                    | 4.0              | 3.0              | 2.8              | 2.6              | 1.0  | 3.2 |
| Камский                            | 2.6                    | 3.0              | 2.5              | 2.5              | 2.6              | 1.0  | 3.0 |
| Волжско-Камский                    | 2.0                    | 3.0              | 3.0              | 3.3              | 2.6              | 0.9  | 3.0 |
| Тетюшский                          | 2.0                    | 4.0              | 3.3              | 3.7              | 2.5              | 1.1  | 3.3 |
| Ундорский                          | 2.0                    | 3.0              | 2.3              | 3.2              | 2.5              | Н.д. | 3.0 |
| Ульяновский                        | 2.7                    | 3.0              | 1.5              | 3.5              | 2.5              | Н.д. | 3.2 |
| Приплотинный                       | 2.5                    | 3.0              | 2.5              | 3.1              | 2.5              | Н.д. | 3.2 |
| Куйбышевское водохранилище в целом | 2.3                    | 3.3              | 2.3              | 3.2              | 2.5              | 1.0  | 3.1 |

Примечание. Н.д. – нет данных.

При оценке экологического состояния экосистем Куйбышевского водохранилища использовались комплексные показатели (табл. 2), каждому из которых присваивали весовые коэффициенты, зависящие от конкретных региональных условий (уровня связи с загрязнением, социальной и экологической значимости показателя).

Наибольший вклад в значение ИЭС Куйбышевского водохранилища вносят интегральные показатели, характеризующие фитопланктонное и бентосное сообщества. Первый – представляет собой ответ на наблюдаемое эвтрофирование водохранилища, а второй – показатель опасности токсичных веществ, накопленных в донных отложениях за время существования Куйбышевского водохранилища. Примененный в данной работе триадный метод выявил взаимосвязь между уровнем загрязнения донных отложений и наблюдаемым обеднением видового разнообразия бентосного сообщества за счет токсического воздействия. Очевидно, что донные отложения выступают источником поступления токсичных и биогенных веществ в воду, а также фактором риска накопления металлов (Zn и Pb) в высших звеньях пищевой цепи – рыбе. Подыиндекс, характеризующий состояние макрозообентоса (ИБС<sub>б</sub>), вносит наибольший вклад в ИЭС нижних плесов Куйбышевского водохранилища.

Таким образом, по оцененному показателю ИЭС (3.0–3.3) Куйбышевское водохранилище характеризуется низким экологическим потенциалом и повышенным уровнем риска.

#### **Анализ риска для здоровья населения при поступлении в организм загрязняющих веществ с питьевой водой и рыбой**

Канцерогенные вещества (ПАУ, ПХБ и пестициды) не были выявлены в рыбе и воде Куйбышевского водохранилища, поэтому характеристика риска в отношении веществ, не обладающих канцерогенным эффектом, определялась по величине индекса риска ( $ИР = СДД / RfD$ ) путем сопоставления фактического суточного воздействия (суточной дозы СДД) с величиной референтной дозы (RfD) [1, 3], которая бралась из базы данных интегрированной информационной систем о рисках и таблиц оценки эффекта (IRIS/HEAST) на здоровье (<http://cfpub.epa.gov/iris>).

Суточная доза находилась по формуле:

$$СДД_i = \frac{C_i \cdot V_i \cdot t}{T \cdot M},$$

где  $C_i$  – концентрация химического вещества в среде (воде) в мг/кг;  $V_i$  – объем носителя химического вещества, контактирующего с организмом человека в течение дня (2 л);  $t$  – продолжительность периода контакта, лет;  $T$  – продолжительность усредненного периода, лет;  $M$  – масса тела, кг.

Расчет риска проводился для условия пожизненного (70 лет) потребления воды человеком массой 70 кг:

$$\sum ИР_B = \frac{СДД_{Zn}}{RfD_{Zn}} + \frac{СДД_{Cd}}{RfD_{Cd}} + \frac{СДД_{Ni}}{RfD_{Ni}} + \frac{СДД_{Mn}}{RfD_{Mn}} + \frac{СДД_{NO_2}}{RfD_{NO_2}} + \frac{СДД_{NO_3}}{RfD_{NO_3}} + \frac{СДД_{фен}}{RfD_{фен}} + \frac{СДД_{ГХЦГ}}{RfD_{ГХЦГ}} = 0.18.$$

Расчет риска при употреблении рыбы в пищу выполнялся для токсичных металлов, содержащихся в мышцах рыб. При расчете средней суточной дозы использовалась концентрация  $C_i$  химического вещества в среде (рыбе) в мг/кг, объем  $V_i$  носителя химического вещества, контактирующего с организмом человека в течение дня (для разового суточного потребления рыбы 113 г); расчет риска проводился для условия пожизненного (70 лет) потребления рыбы человеком массой 70 кг.

$$\sum ИР_p = \frac{СДД_{Zn}}{RfD_{Zn}} + \frac{СДД_{Cd}}{RfD_{Cd}} + \frac{СДД_{Cr}}{RfD_{Cr}} + \frac{СДД_{Mn}}{RfD_{Mn}} + \frac{СДД_{Hg}}{RfD_{Hg}} + \frac{СДД_{Pb}}{RfD_{Pb}} = 0.44.$$

Суммарный индекс риска для населения, употребляющего питьевую воду и рыбу из Куйбышевского водохранилища, составляет  $ИР = 0.62$ . Полученная величина риска не представляет серьезной угрозы здоровью населения, однако отмеченные сезонные всплески численности синезеленых водорослей (602.8–951.7 тыс. кл/мл) в соответствии с нормативами ВОЗ представляют повышенный уровень риска воздействия цианотоксинов и требуют применения дополни-

тельных мер по очистке питьевой воды или поиску альтернативных источников водоснабжения.

### Заключение

Таким образом, на примере Куйбышевского водохранилища разработана методология оценки экологического риска, состояния и экологического потенциала водной экосистемы на основе научных подходов, включающих определение временных и пространственных сукцессий основных групп гидробионтов, относящихся к различным трофическим уровням, и изменений состояния среды их обитания, а также состояния здоровья населения, проживающего на водосборе. Показано, что разработанный и апробированный алгоритм поэтапной оценки экологического риска для устойчивого функционирования Куйбышевского водохранилища на современном этапе его развития позволяет охарактеризовать уровень риска как повышенный, соответствующий низкому экологическому потенциалу экосистемы, и выявляет тенденцию к дестабилизации.

### Summary

*N.Yu. Stepanova.* Ecological Risk Assessment of Sustainable Functioning of Kuibishev Water Reservoir.

The article presents summarized data on ecological risk assessment for Kuibishev water reservoir. On the basis of classification system, Kuibishev water reservoir was characterized as a water basin with poor ecological potential and high level of ecological risk.

**Key words:** ecological risk, water reservoir, ecosystem functioning.

### Литература

1. *Евгеньев М.И., Евгеньева И.И.* Контроль и оценка экологического риска химических производств. – Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ, 2007. – 207 с.
2. EPA/630/R-95/002F. Guidelines for Ecological Risk Assessment Risk Assessment Forum / U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, DC, 1998.
3. Chemical risk assessment. Office of Science and Technology. – Washington, 2001. – 229 p.
4. *Кондратьева Л.М.* Факторы и критерии экологического риска в мониторинге водных объектов бассейна реки Амур // 2-й Дальневост. Междунар. эконом. Форум. – Хабаровск, 2007. – Режим доступа: [http://www.dvforum.ru/doklads/ks8\\_Kondrat.aspx](http://www.dvforum.ru/doklads/ks8_Kondrat.aspx).
5. EPA/630/R-00/002. Supplementary Guidance for Conducting Health Risk Assessment of Chemical Mixtures / Risk Assessment Forum U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, DC 20460, 2000. – 209 p.
6. *Тихомиров Н.П., Потравный И.М., Тихомирова Т.М.* Методы анализа и управление эколого-экономическими рисками. – М.: Юнити-Дана, 2003. – 350 с.
7. *Foudoulakis M.* Ecotoxicological risk assessment for plant protection in Europe // Ecotoxicology, Ecological Risk Assessment and Multiple Stressors. – Springer, Netherlands, 2006. – P. 137–154.
8. *Baird D.J., Rubach M.N., Van den Brink P.J.* Trait-Based Ecological Risk Assessment (TERA): The New Frontier // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2008. – V. 4, No 1. – P. 2–3.

9. *Strause K.D., Zwiernik M.J., Newsted J.L., Neigh A.M., Millsap S.D., Park C.S., Moseley P.P., Kay D.P., Bradley P.W., Jones P.D., Blankenship A.L. Sikarskie J.G.* Risk Assessment Methodologies for Exposure of Great Horned Owls (*Bubo virginianus*) to PCBs on the Kalamazoo River, Michigan // *Integrated Environmental Assessment and Management*. – 2008. – V. 4, No 1. – P. 24–40.
10. Перечень методик, внесенных в государственный реестр методик количественного химического анализа. Ч. 1. Количественный химический анализ вод. – М., 2006.
11. *Макрушин А.В.* Биологический анализ качества вод. – Л.: Изд-во ЗИН АН СССР, 1974. – 60 с.
12. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Ред. В.А. Абакумов. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 318 с.
13. *Chapman P.M.* Sediment quality criteria from the sediment quality triad: an example // *Env. Tox. Chem.* – 1986. – No 5. – P. 957–964.
14. *Deckere E., Cooman W., Florus M., Devroede-Vander Linder M.P.* Characterizing the sediments of Flemish Watercourses: a Manual produced by TRIAD. – Brussel: AMINAL-Department Water, 2000. – 110 p.
15. *Аришаница Н.М., Лесников Л.А.* Патологоморфологический анализ состояния рыб в полевых и экспериментальных условиях // *Сб.: Методы ихтиотоксикологических исследований*. – Л., 1987. – С. 7–9.
16. *Кузнецов В.А., Файзуллин Д.Р.* Видовое разнообразие и численность личинок рыб в верхней части Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2004–2006 гг. // *Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: Тез. докл. VII республиканской науч. конф.* – Казань, 2007. – С. 101–102.
17. *Шакирова Ф.М., Таиров Р.Г., Латыпова В.З.* Роль чужеродных видов в изменении гидрофауны Куйбышевского водохранилища // *Современные аспекты экологии и экологического образования*. – Казань, 2005. – С. 315–316.
18. *Калайда М.Л.* Экологическая оценка Куйбышевского водохранилища в условиях антропогенного воздействия. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2003. – 135 с.
19. *Шакирова Ю.А.* Роль водного фактора в формировании здоровья населения // *Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов: Сб. науч. тр.* – Казань, 2006. – С. 458–460.
20. *Степанова Н.Ю., Латыпова В.З., Анохина О.К.* Экологическое нормирование содержания загрязняющих веществ в донных отложениях // *Проблемы региональной экологии*. – 2007. – № 4. – С. 40–47.
21. *Филенко О.Ф., Дмитриева А.Г., Исакова Е.Ф., Ипатов В.И., Прохоцкая В.Ю., Самойлова Т.А., Черномордина А.В.* Механизмы реагирования водных организмов на воздействие токсичных веществ // *Антропогенные влияния на водные экосистемы*. – М.: Т-во науч. изд. КМК, 2005. – С. 70–93.
22. *Шутиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
23. *Андроникова И.Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. – СПб.: Наука, 1996. – 190 с.

Поступила в редакцию  
15.04.08

---

**Степанова Надежда Юльевна** – кандидат биологических наук, доцент кафедры прикладной экологии Казанского государственного университета.

E-mail: [step@mi.ru](mailto:step@mi.ru)